

原子間力顕微鏡における制御応用とその展望

山末 耕平*・引原 隆士*

1. はじめに

1959年, 物理学者 R. P. Feynman は, “There’s Plenty of Room at the Bottom” と題した彼の講演で, マイクロ・ナノスケールにおける科学・工学の重要性を指摘し, その将来を予測した [1]. 以来 50 年が経過した今日では, ナノテクノロジーと総称される分野が, 進展著しい分野の一つとなっている. その契機の一つとなったのが, 走査型プローブ顕微鏡 (Scanning Probe Microscopy; SPM) とよばれる一連の顕微鏡技術の発明である [2]. SPM は, プローブとよばれる探針を試料表面に近接させて走査し, プローブと試料表面の局所領域に生じる相互作用を逐一記録・マッピングすることで, 走査領域上の表面に関する情報をナノスケールで得ようとするものである. 相互作用を司る物理現象によって, SPM は分類されており, トンネル効果に基づく走査型トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscopy; STM), 力学的相互作用に基づく原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscopy; AFM), 近接場光を利用する走査型近接場光顕微鏡 (Scanning Near-field Optical Microscopy; SNOM) などが知られている [2].

AFM は, IBM の Binnig らにより 1985 年に発明され [3], SPM の中でも特に重要な位置を占めている [4,5]. 測定原理は, プローブと試料表面の力学的相互作用に基づいており, プローブとしてカンチレバーとよばれる微小な板ばねが用いられる. カンチレバー自由端には探針が加工されており, 探針と試料表面間の力学的相互作用が, カンチレバーの変位や共振周波数などの変化として検出される. このため, トンネル電流検出に基づく STM とは異なり, AFM では導電性・半導体試料だけではなく, 絶縁性試料の高分解能観察が可能になる. この特徴から, AFM は SPM の応用領域を, 伝統的な材料科学や表面科学の分野に加え, ライフサイエンスや高分子化学, それらを利用した有機エレクトロニクスにまで広げるものと見込まれている [4,5]. 発明以来, 様々な測定手法の提案や長年にわたる装置開発が行われ, 現在では, 真空中, 大気中, 液中環境のいずれでも, 原子分解能を非破壊で達成している [6]. さらに, 顕微鏡としての機

能に加えて, 物性評価 [7], 表面加工・リソグラフィへの応用 [8], 超高密度記憶装置の提案 [9] などがなされている. また, 近年では, AFM による単一原子や分子の操作, 交換, 識別といったことまで, 研究室レベルでは達成されており, 原子・分子レベルでデバイスを組み上げるいわゆるボトムアップ方式のデバイス作製の将来的な可能性が示されている [5,10].

本解説では, 以上に述べた AFM に関連する制御応用について概説する. 欧米では, 1990 年代の終わり頃から, 制御工学の研究者が課題に取り組み始め, すでに 2000 年前半から現代制御理論に基づく具体的な成果が得られている. 一方, わが国では, 装置メーカーも数多く, AFM の研究グループが世界的にも注目される先駆的な成果をあげているものの, AFM に関わる制御工学分野の研究者は多いとはいえない. AFM を含む SPM は, 探針-試料表面間の距離制御に基づいており, ここではフィードバック制御が必要不可欠である. また, 原子操作 [5,10], 高速 AFM [11] など最先端の研究においても, フィードバック制御が用いられている. このように AFM (より広く SPM) 分野と制御工学との関わりは深く, 制御分野の研究者にとって興味深い応用領域となりえる. そこで, 本解説では, まず AFM の基礎を概説し, つぎに, 制御応用の具体例として, 3次元位置決め装置へのフィードバック制御の適用に関して紹介する. また, 著者らによる研究の中から, カンチレバーに生じるカオス振動の時間遅れフィードバック制御による安定化に関する結果を紹介する.

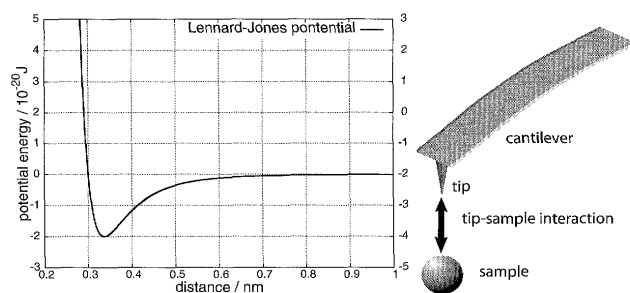
2. 原子間力顕微鏡の動作原理

2.1 探針-試料表面間相互作用

AFM の動作原理は, 物体間に働く相互作用の力学的検出に基づいており, ナノスケールでは分子間力や表面張力, 静電気力などが支配的である [2]. 物体同士をナノメートル程度にまで近づけると, ある距離までは相互に引きあう (引力領域) が, さらに近づけるとパウリの排他原理に基づく斥力が急激に増大する (斥力領域). その経験的なモデル化の代表例として, Lennard-Jones ポテンシャルが知られている (第 1 図参照). ここで, この相互作用を微小な板ばねを用いて検出することを考えよう. 第 1 図に示す通り, 板ばねは一端を固定し, 他端

* 京都大学 大学院 工学研究科

Key Words: scanning probe microscopy, atomic force microscopy, nanotechnology, cantilever, nonlinear dynamics.



第1図 探針-試料表面間相互作用

を自由端としたカンチレバー構造であり、自由端には鋭い探針が加工されているものとする。探針を試料表面にごく近接させるとき、探針と試料表面間で相互作用が生じる（探針-試料表面間相互作用）。その結果、カンチレバーには距離に依存する変位が生じることになる。したがって、カンチレバーの変位を一定に保つフィードバック制御が可能であれば、探針-試料表面間距離をナノメートル以下の精度で一定に保つことが可能になる。さらに、この距離一定制御を行ったまま、試料表面上の所望の領域を探針で走査すれば、フィードバック制御の操作量から表面の凹凸が得られる。

2.2 原子間力顕微鏡の装置構成

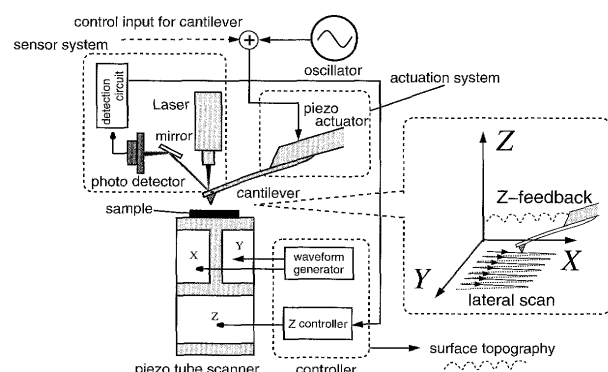
以上の基本原理に基づき、AFMの装置構成の概略と動作を第2図を用いて説明する。AFMは、探針-試料表面間相互作用を検出するセンサであるカンチレバーとカンチレバーを励振するアクチュエータ（励振系）、カンチレバーの変位検出を行うセンサ（変位検出系）、カンチレバーを試料表面上の所望の位置に配置する3次元位置決め装置（スキャナ）、スキャナのコントローラなどから構成される。これを以下では、AFMユニットとよぶ。カンチレバーの種類は多岐にわたり、試料や測定環境により使い分けられる。典型的なサイズは、長さ200 μm 、幅40 μm 、厚さ4 μm 程度であり、ばね定数は0.1 N/mから40 N/m程度、共振周波数は20 kHzから300 kHz程度である。その自由端に加工された探針はきわめて鋭く、市販品の多くでは、先端半径が10 nm以下と規定されている。カンチレバーの探針を観察の対象とする試料表面から数 nm の距離に近接させると、探針-試料表面間

相互作用が働く。この力は、数十ピコニュートンから数ナニュートン程度ときわめて小さい。しかし、上述のように、カンチレバーのサイズは非常に小さいため、その変位の変化は様々な手法で十分に検出可能である。一般的には、変位検出には光てこ法とよばれる手法が簡便かつ高感度なために利用される。振動の検出はロックインアンプやRMS-DCコンバータなどを用いて行われる。探針-試料表面間距離のレギュレーションは、通常、比例積分制御で行われる。形状取得は、探針-試料表面間距離を一定に保ちながら試料表面をラスタスキャンすればよい。現在、多くの市販装置ではラスタスキャン動作はX方向、Y方向に関する開ループ駆動による。表面形状は、レギュレーションの操作量をXY平面上でマッピングすれば得られる。スキャナには、圧電素子を用いたチューブスキャナなどが用いられ、高電圧アンプを介して駆動される。そのほか、レーザドライバやコリメートレンズなどの光学系、また、表面像の画像化や補正、解析を行うソフトウェアが必要である。

2.3 動作モード

AFMの動作モードは、コンタクトモードとダイナミックモードに大きく分類される。コンタクトモードは、2.1で述べた原理に基づいて、カンチレバーを励振せず、探針を試料に接触させて、カンチレバーの静的な変位を検出する方式である。カンチレバーのばね定数が小さく柔らかいほど、感度は高い。しかしながら、ばね定数が小さくなると、カンチレバーによる復元力が引力的相互作用より小さくなり、結果として、探針が表面に凝着してしまうため、ある程度の硬さが要求される。探針が凝着すると、試料表面との間に働く大きな斥力相互作用により、探針、表面双方に大きな損傷が生じる可能性がある。また、走査時に凝着した探針が水平方向に引きずられることで、摩擦が生じ、これもまた表面損傷の原因となる。大気中で親水性表面の観察を行う場合、試料表面に水の層が存在する場合がある。探針を試料表面に近づけると水による架橋が生じ、探針には大きな引力が作用する。この液体の架橋による引力は、メニスカス力とよばれ、正常な表面走査を妨げる原因となる。

一方、ダイナミックモードでは、カンチレバーを共振周波数近傍で振動させ、その共振周波数の変化を検出する。カンチレバーを振動させることで、探針の試料表面への凝着が抑制され、安定な試料走査が可能となる。ダイナミックモードAFMは、さらに二つの主要な動作モードに大別される。一つはカンチレバーを強制振動させ、共振周波数の変化を振動振幅の変化から求める振幅変調方式(AM-AFM; Amplitude Modulation AFM)[12]、もう一つはカンチレバーを自励発振させ、共振周波数を直接検出する周波数変調方式(FM-AFM; Frequency Modulation AFM)である[13]。感度は、高いQ値をもつカンチレバーを用いることで飛躍的に向上する。ま



第2図 原子間力顕微鏡の基本構成

た、カンチレバーを振動させることで、探針の試料表面への凝着を防止できるため、水平方向への摩擦力に起因する表面の損傷を大幅に減らすことができる。カンチレバーの Q は真空中で 10000 から 30000 程度、大気中で数 100、液中では液体の粘性により 10 以下にまで低下する。AM-AFM は、主として大気中観察、液中観察に用いられる。カンチレバーを比較的大きな振幅で振動させ、探針を間欠的に試料表面に接触させるという動作条件のため、タッピングモード AFM (tapping-mode AFM) と称される場合もある [14]。 Q 値が大きい真空中では、カンチレバーの振幅の応答速度が著しく低下するため、走査速度を上げることが困難になる。一方、周波数の応答速度は Q 値に依存しないため、真空中では FM-AFM が用いられることが多い [13]。 FM-AFM は、主として引力領域で用いられ、その動作条件に着目して非接触 AFM (NC-AFM ; Non-Contact AFM) とよばれる場合もある。

2.4 雑音

AFM では、超高分解能を実現するため、雑音を取り除く様々な工夫がなされている。たとえば、建築物に生じる長周期の微小な振動も雑音として作用するため、AFM は除振台上に設置される。パッシブ型のものを用いる場合もあるが、より精密な実験ではアクティブ型除振台を用いることが多い。また、大気中観察を行う場合には、音波や周辺の空気の流れが雑音源となり得るため、防音ケースにユニット全体を収容することで、外部音響の影響を取り除くことが行われる。構造共振を抑制するため、装置はできるだけコンパクトな筐体とし、剛性を高めるなど様々な工夫がなされる [15]。

ユニット内部の雑音は、レーザの発振ゆらぎや増幅回路などに起因する検出雑音と、カンチレバーの熱運動などに基づく原理雑音に分けられる。変位検出系は、通例、半導体レーザ、4分割フォトダイオード、オペアンプなどを組み合わせて構成される。支配的な検出雑音として、フォトダイオードで生じるショット雑音や、プリアンプに用いられる高抵抗に由来するジョンソン雑音がある [16]。オペアンプなどの回路素子でも雑音が発生するが、これらの雑音は使用素子や回路構成などの工夫により、かなり低減することができる。一方、原理雑音は、物理的限界を与えている。 $1/f$ ノイズなど様々な雑音が生じるが、中でも支配的なのがカンチレバーの熱振動である。振動モードごとに $k_B T/2$ の振動エネルギーが与えられる。ここで k_B はボルツマン定数、 T は温度である。このため、原子分解能を得たい場合など、原理雑音すら問題になるような精密な実験を行えるように、超高真空・極低温環境での測定が可能な装置が市販されている。

3. 高速表面観察への制御応用

AFM の大きな欠点は、表面観察に時間がかかることである。解像度の設定にもよるが、カンチレバーが試料表面上の指定された領域のラスタスキャンを開始し終了するまでに、およそ 10 分程度の時間を要する。また熱ドリフトとよばれる現象により、測定中に探針と試料の位置関係が少しずつではあるが意図せず変化するため、表面走査に長時間はかけられない。表面走査に要する時間は、カンチレバーの応答速度、スキヤナの帯域、スキヤナを駆動する高電圧アンプの帯域、周辺部材の構造共振など様々な要素に制約される。高速化に向けては、ダンパの設置や構造上の工夫はもちろんであると同時に、フィードバック制御の適用が有効である。

3.1 スキヤナの広帯域化

AFM による表面観察では、探針-試料表面間距離を一定に保つフィードバック制御が用いられるが、その帯域はたかだか数 kHz 程度であり、走査速度を律速する大きな要因となる。たとえば、AM-AFM において大振幅 (数 10 nm) でカンチレバーを振動させる場合、 Z 方向に関して探針-試料表面間距離を一定に保つ制御系は次式で近似できる。ただし、制御系の帯域はカンチレバーの帯域に比較して十分に小さいとする。

$$Z(s) = \frac{K_s \omega_s^2}{s^2 + \frac{\omega_s}{Q_s} s + \omega_s^2} U(s) \quad (1)$$

$$U(s) = C(s)(A_{sp} - Z(s) + D(s) + N(s)) \quad (2)$$

ここで $Z(s)$ は、スキヤナの Z 方向の変位、 U は制御入力である。 ω_s と Q_s は Z 方向の振動モードに関する共振周波数と Q 値である。また、 $D(s)$ は、試料走査にともなうカンチレバーの振動振幅の変化を外乱とみなしたものであり、 $N(s)$ は検出雑音とする。 A_{sp} はセットポイントとよばれる振幅の目標値である。 $C(s)$ は制御器であり、外乱 $D(s)$ に対する $A_{sp} - Z(s)$ の応答を抑制し、その際の制御入力から表面形状が得られる。現実には、様々な要素を考慮する必要があるが、走査速度を高速化するための基本的なアプローチは、(i) 許容される分解能が得られる範囲で、外乱応答を可能な限り速く抑制する制御器 $C(s)$ を見いだすと同時に、(ii) スキヤナの帯域を増加させることである。

スキヤナの高速化に関しては、いくつかのグループがすでに成果を報告している。安藤らのグループは、生体分子の動的挙動を観察するため、典型的な撮像速度 (10 min/枚) をはるかに超える、ビデオレート程度 (約 0.03 s/枚) で撮像が可能な液中高速 AFM を開発した [11]。彼らは、AFM ユニットの構成する要素を総合的に検討した (詳細はたとえば [11] の解説を参照) が、とくに、上述の (i) に関しては、比例要素のゲイン切替えを行っている。また、(ii) に関しては、スキヤナに用いられる圧電素子の共振を抑制するため、 Q 値を低下させるフィードバック

制御を行った。その際、圧電素子の変位を高速で検出することが必要となるが、彼らは、 LC 共振回路を用いた疑似圧電素子を用いて変位推定を行うことで解決している。さらに、近年では、液中原子分解能を持つ高速AFMを目指した高分解能・高速スキャナの開発が進められている [17]。

3.2 現代制御理論の応用

スキャナのフィードバック制御は、従来、古典制御ベースであり、もっぱら実験者の経験や試行錯誤に基づく運用がなされてきたが、近年、現代制御理論をベースに問題をとらえ直すことで、より明解な制御系設計や運用の指針が得られている。Schitterらは、探針-試料表面間の距離一定制御への H^∞ 制御に基づくスキャナの高速度化を実証した [18]。また、Salapakaらも、 H^∞ 制御の適用を提案し、分解能、帯域、モデル化誤差を同時に考慮した H^∞ 補償器を設計した [19]。彼らは比例積分補償器と提案した H^∞ 補償器を実装したうえで、それぞれの場合におけるスキャナの帯域を比較し、その結果、比例積分要素の場合、スキャナの帯域はたかだか2 Hz程度であったのに対して、 H^∞ 補償器では130 Hzが得られたと報告している。2.1で述べたように、典型的には XY 方向に関しては開ループ駆動であるが、彼らは、 H^∞ 補償器に基づく閉ループ駆動とすることで、圧電素子に生じるクリープやヒステリシスの除去と走査速度の高速度化を同時に達成したことになる。

また、Sahooらと白石・藤本らは、オブザーバを用いた表面観察の高速度化を提案している [20,21]。(1),(2)式では、カンチレバーの帯域がスキャナのそれに比較して十分大きいと仮定したが、大気中観察の場合にはカンチレバーの Q 値が高いため、カンチレバーの定常応答に基づく従来手法では走査速度を上げることができない。そこで、Sahooらは、カンチレバーの変位と速度推定を行うオブザーバを構成し、その推定誤差から表面形状を求める手法を提案した [20]。また、白石・藤本らは表面形状を入力端外乱とみなし、これを外乱オブザーバにより推定することで高速な表面形状の推定が行えることを示している [21]。さらに、推定された表面形状を次の形状推定に用いる学習型のオブザーバに基づく表面観察を行い、より高速な形状推定が行えることを確認している [22]。

4. カンチレバー振動の安定化

探針-試料表面間相互作用を受けるカンチレバーの力学系は、一般に非線形力学系となり、とくにAM-AFMでは、カオスを含む多様な振舞いを示すことが知られている [23]。本節では、フィードバック制御によるカオス振動の安定化について、筆者らの取組みを中心に紹介する [35,39]。

4.1 カンチレバーの数式モデル

探針-試料表面間相互作用を受けるカンチレバーは、先端に荷重を受けるEuler-Bernoulli梁とみなすことができる。振動は異なる振動モードの重ね合わせとなるが、特定のモード、とくに1次モード振動のみを考慮して、つぎのような運動方程式で近似することが多い。

$$\ddot{w} = -\omega_0^2 w - \frac{\omega_0}{Q} \dot{w} + f(Z) + g(\dot{w}, t) + \eta(t) + u(t) \quad (3)$$

ここで ω_0 は、1次モード振動の共振周波数、 Q は Q 値であり、周波数特性を測定することで、実験的に求めることができる。 w はカンチレバーの1次モード振動に関する変位であり、振動周波数が共振周波数に十分近ければ、カンチレバーの変位とみなしてよい。 $g(\dot{w}, t)$ には、AM-AFMではカンチレバーを強制励振する場合の周期外力、FM-AFMの場合は自励発振を生じさせるフィードバック項が入る。 $\eta(t)$ は雑音入力である。 $u(t)$ は制御入力であり、4.3で後述する。 $f(Z)$ は探針-試料表面間相互作用であり、様々なモデリングがあるが、たとえばLennard-Jonesポテンシャルを用いる場合は次式で記述される [24]。

$$f(Z) = -\frac{D\omega_0^2}{(Z+w)^2} + \frac{\sigma^6 D\omega_0^2}{30(Z+w)^8} \quad (4)$$

D はHamaker定数とよばれる材料依存の定数とカンチレバーのばね定数から決まる。 σ は、探針および試料を構成する分子または原子の半径であり、ここでは簡単のため、両者は等しいとおいている。右辺第一項は長距離引力、第二項は近距離斥力を表す。探針-試料表面間相互作用のモデルとして、ほかにも様々なものが知られている [24-29]。大胆な近似を行う場合には、長距離引力を無視して、短距離斥力を剛体壁とみなす場合もある。より精密に接触を考慮する場合には、DMT (Dejarguin-Muller-Toporov) 理論やHertzの理論などが適用される [26]。さらに、大気中観察のメニスカスの形成を考慮したヒステリシスをとまなうモデルも提案され [25,26]、カンチレバー力学系をハイブリッドシステム理論の枠組で扱っている例もある [28]。

4.2 非線形振動の発生と画像化への影響

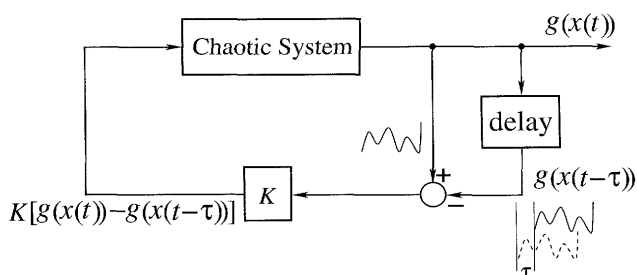
第1図に示す通り、探針-試料表面間相互作用は、カンチレバーの変位に関して線形ではない。このため、カンチレバーと試料表面の作る力学系は、一般には非線形力学系となり、1990年代後半より研究がなされている [24-32]。とくに、AM-AFMでは、探針の表面への衝突という形で、非線形性の影響が顕著に現れる。共振曲線が曲がることで、双安定な振動が生じ、結果として、振動のジャンプやヒステリシス現象が観察される [30]。また、振動の不安定化に伴う分数調波成分を含む振動やカオス振動の発生が早くから理論的に予言されてい

る[24,25]. Melnikovの方法を用いた解析により, 表面近傍では, カンチレバー力学系にカオス的不変集合が存在しうることがわかっている[24]. また, 衝突のダイナミクスに着目することで, カオスの挙動を生じることが明らかにされている[25]. また, 近年, カオス振動が生じることが実験的にも確かめられた[31,32]. カオス振動は, 探針-試料表面間相互作用の非線形に起因して雑音とは別に決定論的に生じるものであるが, 検出系からは雑音とみなされる. このため, S/N比が低下し, 表面像の分解能が低下する[32]. カオス振動に関しては, 標準試料として用いられるHOPG(高配向熱分解黒鉛; Highly Oriented Pyrolytic Graphite)を用いたモデルケースに関して, Huらが詳細な研究を行っており[32], とくに, ばね定数が小さく柔らかいカンチレバーを大きな振幅で振動させた場合に生じやすいことが知られている. しかしながら, AFMの応用領域は幅広く, とくに柔軟試料や液中試料などで十分な知見が得られているとは言い難いため, 今後の研究の進展が望まれる.

4.3 カンチレバー振動のフィードバック制御

時間遅れフィードバック制御(Time-Delayed Feedback Control; TDFC)は, 連続時間のカオス制御法であり, カオスアトラクタに埋め込まれた不安定周期軌道を安定化可能なことで知られている[33]. 第3図に示すように, 目標値を与えるのではなく, 現在および過去の制御出力の差を制御入力とする. 時間遅れ τ を目標軌道の周期に調整し, フィードバックゲインを適切な値にとると, 目標軌道の安定性のみを変化させることができる. 安定性を確保するのに必要な制御入力, 定常状態では雑音のない理想的条件下ではゼロに収束する. TDFCでは, 制御対象であるカンチレバーのモデルや共振周波数, ばね定数などパラメータの同定を必要としない. このため, 実機に適用することは比較的容易である. 著者らは, 磁気弾性梁で進めていたカオス制御の研究結果[34]に基づいて, AFMのカンチレバーに生じるカオス振動の安定化に時間遅れフィードバック制御を応用することを提案した[35]. 制御則 $u(t)$ は, フィードバックゲインを K として次式で与えられる.

$$u(t) = K[\dot{w}(t-\tau) - \dot{w}(t)] \quad (5)$$

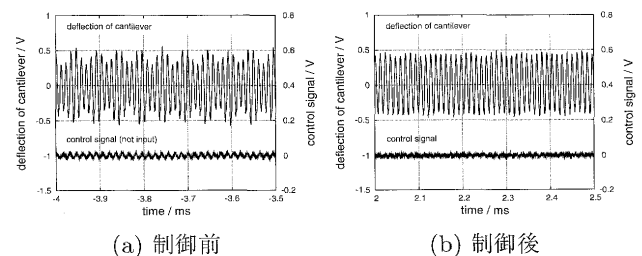


第3図 時間遅れフィードバック制御

時間遅れ τ は強制励振を行うAM-AFMの励振信号の周期に調整すればよい. 著者らは, まず, 不安定周期軌道の安定化が可能であることを数値計算により確認することができた[35].

TDFCを市販のAFMユニットに実装するにはいくつかの課題がある. まず, カンチレバーは, 数10kHzから300kHz程度の共振周波数で励振されるため, 変位検出系の広帯域化が必要となる場合がある. また, 励振は2.2に述べた通り, ほとんどの市販装置では, カンチレバーホルダに内蔵された圧電素子で行われる. カンチレバー探針に, 直接, 力が加わるわけではなく, ホルダやカンチレバー支持部の部材およびそれらの接触部分を介して振動が伝達され, その伝達特性は非常に複雑である. これに対して, カンチレバーを直接駆動可能な様々な励振手法が提案されている. 磁性薄膜コートされたカンチレバーを磁場で励振する磁場励振法[36]や, レーザ照射によるカンチレバーの熱膨張を用いる光熱励振[37]はその代表例である. また, 圧電薄膜を付加した特殊なカンチレバーも用いられる[38]. これらの励振法を用いた場合, 広い帯域にわたって平坦な周波数特性が得られ, 所望の制御効果を期待できる. なお, 2次モードやねじれモードなど高次の振動モードとのスピルオーバーを生じ, 意図した制御効果が得られない場合もある.

著者らは, 市販装置を改造し, 変位検出系の広帯域化, 磁場励振法を適用可能な装置を構成し, コントローラの実装を行った. コントローラはA/Dコンバータ, FIFO(First-In First-Out)メモリ, D/Aコンバータを用いたデジタルディレイラインをプリント基板上に実装した. 第4図に不規則振動を安定化させた実験結果を示す[39]. 第4図(a)に示すように, 探針を試料表面に近づけると, 不規則かつ非周期的な振動が生じる. 制御を投入すると, 振動は第4図(b)に示す通り, 振動は安定化され, 制御入力がほぼゼロに収束していることが確認できる. 本結果は, TDFCによる不安定周期軌道の安定化を実証しており, 不規則振動による分解能の低下がTDFCにより抑制可能であることを示している.



第4図 時間遅れフィードバック制御による不規則振動の安定化[39]

5. おわりに

本解説では, AFMにおける制御応用について述べた. 実際のAFMでアイデアを実現するためには, 装置開

発上のノウハウが必要とされるため、研究を遂行するうえで制御工学とSPMの研究者による協力体制を築くことも重要になるだろう。AFMの分野では、再現性と定量性のさらなる向上など課題も多い[15]。また、誌面の都合上多くの話題を割愛したが、近年では、複数のプローブを用いるマルチ・プローブ型のSPMの開発[40]など興味深い話題も多いことを付記しておく。最後に、制御工学の視点から書かれた優れたAFMの解説論文として、文献を3件[15,18,41]紹介する。これらとあわせて、本解説がSPM分野の動向と制御応用の現状把握の一助となれば幸いである。

(2009年1月27日受付)

謝 辞

本解説をまとめるにあたり有益な御助言、御示唆を頂いた京都大学大学院工学研究科 松重和美教授、山田啓文准教授、京都大学産官学連携センター小林圭助教に深く感謝致します。また、走査型プローブ顕微鏡分野の視点から原稿を読んで頂きました京都大学大学院工学研究科 佐藤宣夫助教、宮戸祐治博士に心よりお礼申し上げます。本解説に関わる研究の一部は科学研究費補助金(20760238)および文部科学省グローバルCOEプログラム「光・電子理工学の教育研究拠点形成」の助成を受けています。

参考文献

- [1] R. P. Feynman: There's plenty of room at the bottom; *Engineering and Science*, Vol. 23, No. 5, pp. 22-36 (1960)
- [2] D. Sarid: *Scanning Force Microscopy: with Applications to Electric, Magnetic, and Atomic Forces*, Oxford University Press, Inc., Rev. ed. (1994)
- [3] G. Binnig, C. F. Quate and C. Gerber: Atomic force microscope; *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 56, No. 9, pp. 930-933 (1986)
- [4] R. García and R. Pérez: Dynamic atomic force microscopy methods; *Surf. Sci. Rep.*, Vol. 47, No. 6-8, pp. 197-301 (2002)
- [5] 森田 (編) : 原子・分子のナノ力学, 丸善 (2003)
- [6] T. Fukuma, K. Kobayashi, K. Matsushige and H. Yamada: True atomic resolution in liquid by frequency-modulation atomic force microscopy; *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 87, No. 3, pp. 034101-034103 (2005)
- [7] M. Nonnenmacher, M. P. O'Boyle and H. K. Wickramasinghe: Kelvin probe force microscopy; *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 58, No. 25, pp. 2921-2923 (1991)
- [8] K. Wilder, C. F. Quate, D. Adderton, R. Bernstein and V. Elings: Noncontact nanolithography using the atomic force microscope; *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 73, No. 17, pp. 2527-2529 (1998)
- [9] H. J. Mamin, R. P. Ried, B. D. Terris and D. Rugar: High-density data storage based on the atomic force microscope; *Proceedings of the IEEE*, Vol. 87, No. 6, pp. 1014-1027 (1999)
- [10] 阿部, 杉本, 森田: 原子分解能を有する原子間力顕微鏡法の新展開: 原子種識別や原子操作を行うための新技術 (実験技術); 日本物理學會誌, 第62巻, 11号, pp. 829-837 (2007)
- [11] 安藤, 古寺: 高速ビデオレートAFM; 計測と制御, 第45巻, 2号, pp. 1-6 (2005)
- [12] Y. Martin, C. C. Williams and H. K. Wickramasinghe: Atomic force microscope-force mapping and profiling on a sub 100-Å scale; *J. Appl. Phys.*, Vol. 61, No. 4, pp. 4723-4729 (1987)
- [13] T. R. Albrecht, P. Grütter, D. Horne and D. Rugar: Frequency modulation detection using high-Q cantilevers for enhanced force microscope sensitivity; *J. Appl. Phys.*, Vol. 69, No. 2, pp. 668-673 (1991)
- [14] Q. Zhong, D. Inniss, K. Kjoller and V. B. Elings: Fractured polymer / silica fiber surface studied by tapping mode atomic force microscopy; *Surf. Sci.*, Vol. 290, No. 1-2, pp. L688-L692 (1993)
- [15] D. Y. Abramovitch, S. B. Andersson, L. Y. Pao and G. Schitter: A tutorial on the mechanisms, dynamics, and control of atomic force microscopes; *American Control Conference, 2007 (ACC '07)*, pp. 3488-3502 (2007)
- [16] T. Fukuma, M. Kimura, K. Kobayashi, K. Matsushige and H. Yamada: Development of low noise cantilever deflection sensor for multienvironment frequency-modulation atomic force microscopy; *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 76, No. 5, pp. 053704-1-053704-8 (2005)
- [17] T. Fukuma, Y. Okazaki, N. Kodera, T. Uchihashi and T. Ando: High resonance frequency force microscope scanner using inertia balance support; *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 92, No. 24, pp. 243119-1-243119-3 (2008)
- [18] A. Stemmer, G. Schitter, J. M. Rieber and F. Allöwer: Control strategies towards faster quantitative imaging in atomic force microscopy; *Eur. J. Control.*, Vol. 11, No. 4-5, pp. 384-395 (2005)
- [19] S. Salapaka, A. Sebastian, J. P. Cleveland and M. V. Salapaka: High bandwidth nano-positioner: A robust control approach; *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 73, No. 9, pp. 3232-3241 (2002)
- [20] D. R. Sahoo, A. Sebastian and M. V. Salapaka: Observer based imaging methods for atomic force microscopy; *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005* (2005)
- [21] 白石, 藤本: タッピングモードAFMにおける表面形状オブザーバの提案; 平成19年電気学会産業計測制御研究会「ナノスケールサーボのための制御技術」, 第IIC-07-117巻, pp. 7-12 (2007)
- [22] T. Shiraishi and T. Fujimoto: Realization of high-speed measurement of AM-AFM using surface topography learning observers; *Proc. SICE Annual Conference*

- ence 2008, pp. 2568–2573 (2008)
- [23] A. Raman, M. John and T. Ryan: Cantilever dynamics in atomic force microscopy; *Nano Today*, Vol. 3, No. 1-2, pp.20–27 (2008)
- [24] M. Ashhab, M. V. Salapaka, M. Dahleh and I. Mezić: Melnikov-based dynamical analysis of microcantilevers in scanning probe microscopy; *Nonlinear Dynam.*, Vol. 20, No. 3, pp. 197–220 (1999)
- [25] W. van de Water and J. Molenaar: Dynamics of vibrating atomic force microscopy; *Nanotechnology*, Vol. 11, No. 3, pp. 192–199 (2000)
- [26] J. Berg and G. A. D. Briggs: Nonlinear dynamics of intermittent-contact mode atomic force microscopy; *Phys. Rev. B*, Vol. 55, No. 22, pp. 14899–14908 (1997)
- [27] S. Rützel, S. I. Lee and A. Raman: Nonlinear dynamics of atomic-force-microscope probes driven in Lennard-Jones potentials; *Proc. R. Soc. Lon. Sea-A.*, Vol. 459, No. 2036, pp. 1925–1948 (2003)
- [28] N. Hashemi, H. Dankowicz and M. R. Paul: The nonlinear dynamics of tapping mode atomic force microscopy with capillary force interactions; *J. Appl. Phys.*, Vol. 103, No. 9, pp. 093512–1–093512–6 (2008)
- [29] R. García and A. San Paulo: Dynamics of a vibrating tip near or in intermittent contact with surface; *Phys. Rev. B*, Vol. 61, No. 20, pp. R13381–R13384 (2000)
- [30] N. Sasaki, M. Tsukada, R. Tamura, K. Abe and N. Sato: Dynamics of the cantilever in noncontact atomic force microscopy; *Appl. Phys. A-Mater.*, Vol. 66, No. S1, pp. 287–291 (1998)
- [31] F. Jamitzky, M. Stark, W. Bunk, W. M. Heckl and R. W. Stark: Chaos in dynamic atomic force microscopy; *Nanotechnology*, Vol. 17, No. 7, pp. S213–S220 (2006)
- [32] S. Hu and A. Raman: Chaos in atomic force microscopy; *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 96, No. 3, pp. 036107-1–036107-4 (2006)
- [33] K. Pyragas: Continuous control of chaos by self-controlling feedback; *Phys. Lett. A*, Vol. 170, No. 6, pp. 421–428 (1992)
- [34] T. Hikihara and T. Kawagoshi: An experimental study on stabilization of unstable periodic motion in magneto-elastic chaos; *Phys. Lett. A*, Vol. 211, No. 1, pp. 29–36 (1996)
- [35] K. Yamasue and T. Hikihara: Control of microcantilevers in dynamic force microscopy using time delayed feedback; *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 77, No. 5, pp. 053703-1–053703-6 (2006)
- [36] W. Han, S. M. Lindsay and T. Jing: A magnetically driven oscillating probe microscope for operation in liquids; *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 69, No. 26, pp. 4111–4113 (1996)
- [37] O. Marti, A. Ruf, M. Hipp, H. Bielefeldt, J. Colchero and J. Mlynek: Mechanical and thermal effects of laser irradiation on force microscope cantilevers; *Ultramicroscopy*, Vol. 42-44, No. Part 1, pp. 345–350 (1992)
- [38] S. Watanabe and T. Fujii: Micro-fabricated piezoelectric cantilever for atomic force microscopy; *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 67, No. 11, pp. 3898–3903 (1996)
- [39] K. Yamasue, K. Kobayashi, H. Yamada, K. Matsushige and T. Hikihara: Controlling chaos in dynamic-mode atomic force microscope (submitted)
- [40] N. Satoh, E. Tsunemi, Y. Miyato, K. Kobayashi, S. Watanabe, T. Fujii, K. Matsushige and H. Yamada: Multi-probe atomic force microscopy using piezoelectric cantilevers; *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 46, No. 8B, pp. 5543–5547 (2007)
- [41] S. M. Salapaka and M. V. Salapaka: Scanning probe microscopy; *Control Systems Magazine, IEEE*, Vol. 28, No. 2, pp. 65–83 (2008)

著者略歴

やま すえ こう へい
山末 耕平



1979年生。2007年京都大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程修了。2007年同大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー博士研究員を経て、2008年8月同大学大学院工学研究科電子工学専攻およびベンチャー・ビジネス・ラボラトリー助教。主として、非線形動力学とその応用、カオス制御、原子間力顕微鏡における非線形力学とその制御の研究に従事。京都大学博士(工学)。電子情報通信学会、APSなどの会員。

ひき ほう たか し (正会員)
引原 隆士



1958年生。1987年京都大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程研究指導認定退学。関西大学工学部を経て、1997年京都大学大学院工学研究科電気工学専攻助教教授、2001年同教授。主として、非線形動力学およびその工学的応用、カオス制御、磁気浮上システム、ハイブリッドシステム、ナノテクノロジーと非線形力学の接点に関する研究に従事。京都大学工学博士。電気学会、電子情報通信学会、IEEE、IET、SIAM、APSなどの会員。